

新型四换热器流程太阳能辅助多功能热泵实验研究[†]

王勤 王世宽 贺伟 刘玉迁 徐象国 韩晓红 陈光明

(浙江大学制冷与低温研究所, 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

(Tel: 0571-87951738, Email: hanxh66@zju.edu.cn)

摘要: 本文提出了一种新型四换热器流程太阳能辅助多功能热泵, 不但具有家用冷暖空调、热泵热水器和太阳能热水器这三种家用节能产品所包含的制冷、制热和制热水功能, 而且具有制冷兼制热水、太阳能辅助制热、太阳能辅助制热水、热水除霜等四种更加节能的新运行模式来实现这三项功能。在自行搭建的实验装置上成功地实现了七种热泵运行模式之间的平稳过渡和高效实现。太阳能辅助制热和太阳能辅助制热水模式的实验结果表明, 该新型太阳能辅助多功能热泵可以利用太阳能来实现较高的室内制热效率和制热水效率。不但大大提高了设备的利用率, 而且可以更好地适应不同季节的气候条件, 起到显著的节能效果。

关键词: 太阳能; 热泵; 实验; 多功能

中图分类号:

文献标识码:

Experimental Research on a Novel Solar-assisted Multifunctional Heat Pump System with Four Heat Exchangers

WANG Qin WANG Shi-Kuan HE Wei LIU Yu-Qian XU Xiang-Guo HAN Xiao-Hong CHEN Guang-Ming

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper proposed a novel solar-assisted multifunctional heat pump system with four heat exchangers. It possessed not only the functions of space cooling, space heating and hot water production included in domestic air-conditioner, heat pump water heater and solar water heater, but also four more energy saving operation modes including space cooling with hot water production, solar-assisted heating, solar-assisted hot water production and defrosting by hot water to realize the three functions. The transitions between seven operation modes have been realized successfully and efficiently on the established experimental setup. The experimental results of the solar-assisted heating and solar-assisted hot water production show that the novel solar-assisted multifunctional heat pump system can realize space heating and hot water production with high efficiency by utilizing solar energy. It can not only take full advantages of the domestic appliances, but also adapt to different climate conditions in different seasons with the obvious energy saving feather.

Key words: Solar Energy; Heat Pump; Experiment; Multifunction

0 引言

21 世纪以来, 随着人民生活水平不断提高, 热泵空调器、热泵热水器和太阳能热水器已成为家庭和工作场所的必需品。但是, 它们独立运行均不能同时具备制冷、制热和制热水这三个现代舒适生活所需的功能。因此, 它们之间的结合, 形成至少具备制冷、制热和制热水 3 项基本功能的多功能热泵也就成为必然的趋势。其中, 以“热泵空调器+太阳能热水器”为主线发展起来的多功能热泵称为太阳能辅助多功能热泵, 它的流程构型在很大的程度上

取决于水箱换热器如何耦合到热泵空调器的制冷剂回路中去。文献^[1]根据太阳能辅助多功能热泵制冷剂回路中的换热器的数量可将多功能热泵流程分为以下三个大类: (1) 两换热器流程^[2]; (2) 三换热器流程^[3]; (3) 多换热器流程^[4]。

不同的多功能热泵的流程基本决定了热泵制造成本、运行费用和运行可靠性三个方面, 在热泵的实际应用中, 不应片面追求结构简单化和功能模式数量, 应根据具体的环境条件和用户要求, 从以上三个方面综合考虑和进行选择。

本文提出并实验研究一个带间膨换热器辅助热

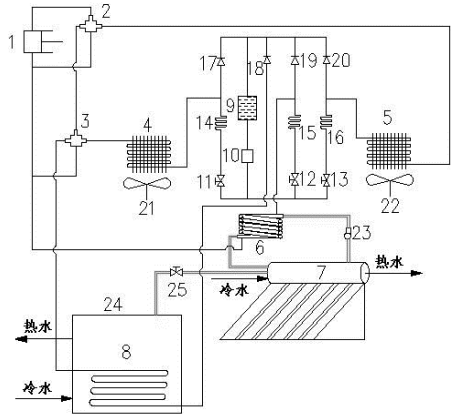
基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51376159)

作者简介: 第一作者: 王勤 (1964-), 男, 教授, 主要从事制冷技术研究。通讯作者: 韩晓红, 副教授, hanxh66@zju.edu.cn。

源水箱的新型四换热器流程^[4]，包含了八种运行模式，可高效稳定地实现普通家庭所需的生活热水和空调的需要。

1 系统特点

本文研究的新型四换热器流程原理如图 1 所示。新流程的八种运行模式见表 1。



1-压缩机; 2,3-四通阀; 4-室内换热器; 5-室外换热器; 6-集热水箱换热器; 7-太阳能集热器及水箱; 8-生活水箱换热器; 9-储液罐; 10-干燥过滤器; 11~13-电磁阀 T3; 14~16-节流元件; 17~20-单向截止阀; 21-室内风机 F1; 21-室外风机 F2; 23-水泵 P; 24-生活水箱; 25-截止阀

图 1 新型流程系统原理图
1-Compressor 2,3-Four-way valves 4-Indoor heat exchanger 5-Outdoor heat exchanger 6- Solar collector water heat exchanger 7-Solar collector water tank 8-Living water tank heat exchanger 9-Reservoir 10-Filter 11~13-Solenoid valves 14~16-Expansion valves 17~20-Check valves 21-22 Fans 23-Water pump 24-Living water tank 25-Water valve
Fig.1 Schematic diagram of the novel system

表 1 新流程的八种运行模式
Table 1 Operation modes of the novel system

功能	运行模式	工作流程
制冷	空气源制冷	1→2→5→20→9→10→11→14→4→3→1
	制冷兼制热水	1→2→3→8→18→9→10→11→14→4→3→1
制热	空气源制热	1→2→3→4→17→9→10→13→16→5→2→1
	太阳能辅助制热	1→2→3→4→17→9→10→12→15→6→1
制热水	太阳能制热水	制冷剂回路关闭，单独使用太阳能热水器
	空气源热泵制热水	1→2→3→8→18→9→10→13→16→5→2→1
	太阳能辅助制热水	1→2→3→8→18→9→10→12→15→6→1
制冷水	热水除霜	1→2→5→20→9→10→12→15→6→1

从图 1 和表 1 可以看到，与文献[3]三换热器流程相比，新流程中增加了一个水源换热器——生活

水箱换热器 8，只作冷凝器，用于加热生活用水，而集热水箱换热器 6 只作蒸发器，用于太阳能辅助制热。这样冬季的太阳能辅助制热模式和热泵制热水模式不再相互干扰，并增加了一种新的节能运行模式——太阳能辅助制热水，可以更好地实现一年四季舒适家庭生活所需要的冷暖空调和生活热水多方面的要求。

2 实验装置

搭建了如图 2 所示的实验装置，包括 1.5 匹松下空调压缩机、室内风冷换热器和室外风冷换热器、真空管集热器、集热水箱容积 300L。集热水箱换热器的采用多芯套管式换热器，管间为水，管内为制冷剂 R407C，水侧用的循环水泵可分三档调节水量的大小。生活水箱容积 80L，生活水箱换热器为沉浸式换热器。采用美国 Hoke 针阀进行制冷剂流量调节，采用鸿森牌 HM2 电磁阀进行节流模块的模式切换。

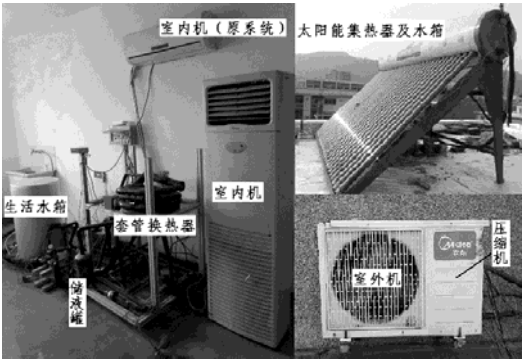


图 2 新型 IX-SAMHP 实验装置
Fig.2 Experimental setup of the novel system

吸气压力和排气压力通过安装在压缩机吸排气管上的压力传感器分别测量，制冷剂温度和水温均采用铜-康铜热电偶温度计测量，空气温度采用四线制 PT100 铂电阻测量。制冷剂流量采用 Emerson 的 CMF025 质量流量计测量。温度、压力和制冷剂流量的二次测量仪器均采用 Agilent 公司 34970A 多功能数据采集器。热电偶、铂电阻和质量流量计均进行了标定。压缩机功率、风冷换热器风机功率和水泵功率采用一个功率表测量，电加热棒功率采用另一个功率表测量，各测量仪表的规格见表 2。

表 2 测量仪表的量程和测量不确定性
Table 2 Ranges and uncertainty of measuring apparatus

测量参数	测量仪表	量程	不确定性
温度	铜-康铜热电偶	-100-100℃	0.1℃
温度	铂电阻 PT100	-100-100℃	0.1℃
吸气压力	压力传感器	0-2.5 MPa	0.3%
排气压力	压力传感器	0-4.0 MPa	0.2%
功率	数字功率表	0-4.0 kW	0.5%
流量	质量流量计	0-1360 kg/h	0.5%

冷凝器的制热率采用制冷剂焓差法得到：

$$Q_h = G(h_{out} - h_{in}) \tag{1}$$

其中, G 为制冷剂质量流量, kg/s , 通过安装在储液罐出口的质量流量计测量得到; h_{out} 和 h_{in} 分别为冷凝器(室内风冷换热器或水源换热器)的进、出口制冷剂焓值, kJ/kg , 它们通过测量冷凝器进、出口处的制冷机的温度和压力后, 通过调用 REFPROP 8.0^[5] 数据库中的子函数计算确定。

室内制热和热泵制热水的系统瞬时制热系数则由下式定义:

$$\text{COP}_h = Q_h/P_h \quad (2)$$

$$\text{COP}_{\text{sys}} = Q_h/P_{\text{sys}} \quad (3)$$

其中, P_{sys} 为系统总功率, kW , 包括压缩机功率、风冷换热器风机功率、水泵功率。 P_h 为不计水泵功率时的系统总功率, kW , 包括压缩机功率、风冷换热器风机功率。

在热泵制热水循环中, 本文中不仅将室内制热循环中定义的 COP_h 和 COP_{sys} 作为循环性能的指标之一, 用以反映循环过程的瞬时性能, 而且还采用了总耗电量 W 作为评价指针, 用以反映制取热水过程中的能耗情况。总耗电量 W 定义为将生活水箱中一定量的水从某一起始水温加热到 55°C 所消耗的电, 其定义式为:

$$W_h = P_h \tau_j \quad (4)$$

$$W_{\text{sys}} = P_{\text{sys}} \tau_j \quad (5)$$

其中, τ 为数据采集时间间隔, h ; j 为第 j 个数据采集时段。 W_h 为不计水泵耗电量时的系统总耗电量, kWh ; W_{sys} 为系统的总耗电量, kWh 。

循环压比 PR 由下式定义:

$$PR = p_{\text{dis}}/p_{\text{suc}} \quad (6)$$

其中, p_{dis} 为压缩机的排气压力, p_{suc} 为压缩机的吸气压力。

3 实验结果和分析

本实验台已成功地实现了如表 1 所列的八种热泵运行模式的平稳切换和稳定运行。限于篇幅, 这里只对太阳能辅助制热和太阳能辅助热泵热水器两种重要节能运行模式的实验结果进行分析。

3.1 太阳能辅助制热模式

该模式是指将太阳能集热器水箱的水作为蒸发器热源, 向室内提供热量。该模式的运行在非稳态条件下测试, 由太阳能集热水箱中预热后的水为制热循环提供热量, 运行过程中水箱中的水温不断下降。水箱的起始水温为 35°C , 终止水温都为 10°C , 室内温度维持在 $19.5^\circ\text{C} \sim 20.5^\circ\text{C}$,

实验在水泵分别置于 I 档和 III 档的情况下进行, 实验过程中各工况手动节流阀的开度一定, 太阳能集热器水温 $T_{w,s}$ 越高, 节流阀开度越大。系统置于 I 档时, 水流量约为 2.3 L/min , 耗功 35 W 左右; 置于 III 档时, 水泵流量约为 4.5 L/min , 约耗功 75 W 。实验结果列于图 3~图 5 中。

从图 3 可以看出, 在辅助制热的前期, 由于水温较高, 压缩机的实际质量输气量增加有限, 限制

了制热量的增加, 导致 COP_{sys} 的变化不是很明显。即运行过程中水温下降的扰动对辅助制热模式的稳定运行不是很大。比较水泵置于 I 档和 III 档的运行情况可以看出, I 档的循环性能要优于 III 档的循环性能。这是因为, 在非稳态条件下的测试中, 节流阀维持在同一开度, 水泵置于 III 档时, 吸气压力较 I 档的偏低(见图 4), 耗功有所增加, 但制热量变化幅度不大(见图 5), 导致 COP_{sys} 偏低。但是在辅助制热的后期, 系统在水泵 I 档运行时的 COP_{sys} 和 III 档的 COP_{sys} 逐步接近。从图 3 可以看出, 系统在 III 档运行时, 全程较为稳定。但在 I 档运行时, 由于节流阀开度一定, 水泵流量较小, 导致系统水温降到 15°C 左右时, 难以维持压缩机吸气过热的状态。此时吸气压力 p_{suc} 和压缩机排气温度 T_{dis} 迅速降低, 制热量 Q_h 减小, COP_{sys} 下降。

从图 3 还可以看出, 系统在水泵 I 档运行时, COP_{sys} 与 COP_h 的差距明显小于系统在水泵 III 档运行时, 得益于水泵功率的减小。

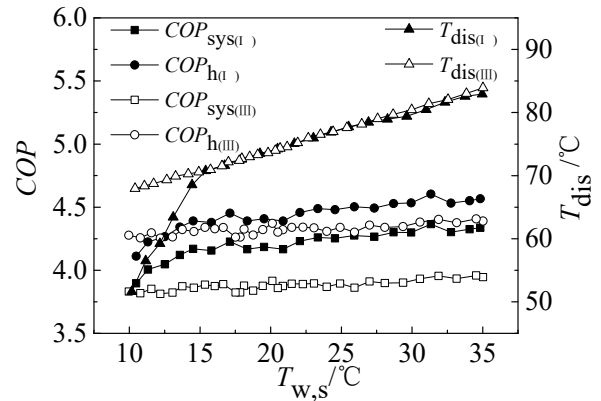


图 3 COP 和 T_{dis} 随集热水箱水温 $T_{w,s}$ 的变化曲线

Fig.3 Variations of COP and T_{dis} with $T_{w,s}$

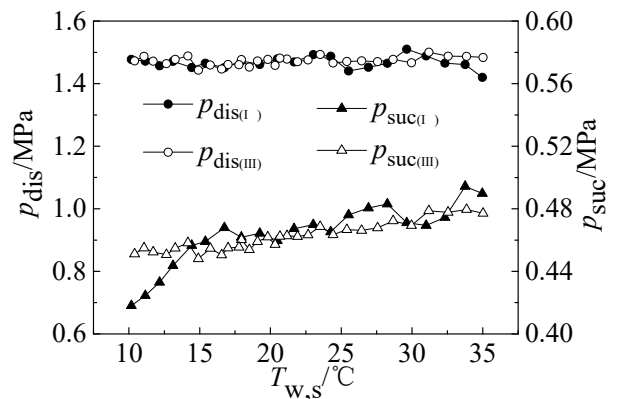
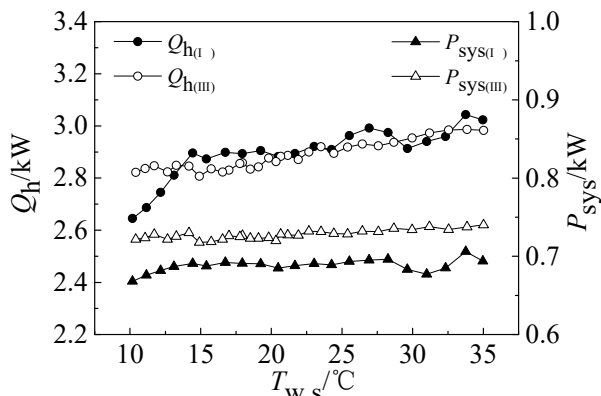


图 4 p_{dis} 和 p_{suc} 随集热水箱水温 $T_{w,s}$ 的变化

Fig.4 Variations of p_{dis} and p_{suc} with $T_{w,s}$

图5 Q_h 和 P_{sys} 随集热水箱水温 $T_{w,s}$ 的变化Fig.5 Variations of Q_h and P_{sys} with $T_{w,s}$

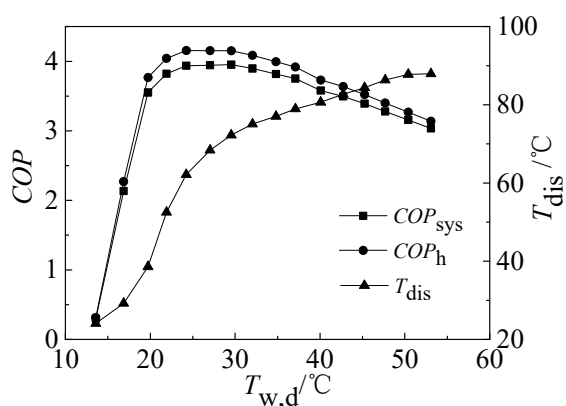
3.2 太阳能辅助制热水模式

本文进行了两种方式的实验研究：（1）水箱起始水温不同制热水：即用太阳能集热器水箱中的水在集热水箱换热器处供热，将生活水箱中的水温 $T_{w,d}$ 由 13℃ 加热到 55℃；（2）起始水温相同制热水：指先将太阳能集热器水箱中的水经连接生活水箱的水管路放到生活水箱中，再用太阳能集热器水箱中剩余的水将生活水箱中的水加热到 55℃。

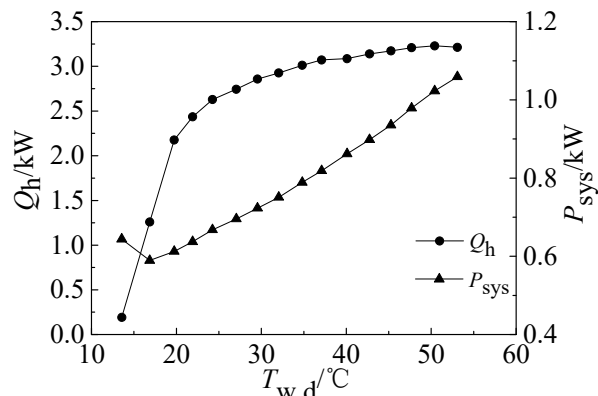
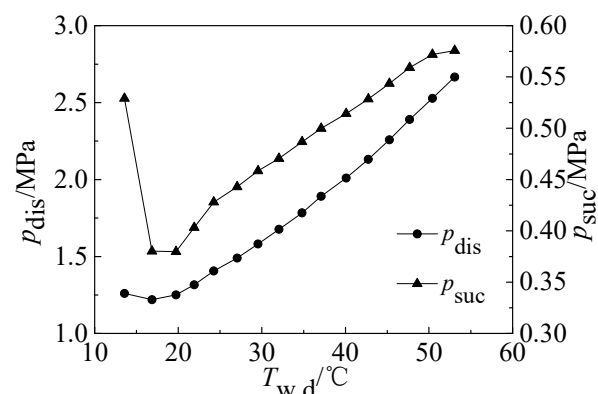
3.2.1 起始水温不同制热水

该运行模式集热水箱中水的起始温度为 27℃，水泵置于 I 档。在制取热水的过程中，节流阀的开度一定，开度的大小以加热终了使压缩机吸气接近饱和蒸汽状态进行适当调节。

在运行过程中，由于节流阀的开度是恒定的，使得水温较高时，压缩机吸气过热度较大，限制了制热量的增加，蒸发器侧水温的波动对性能的影响不大，实验结果列于图 6~图 8 中。

图6 COP 和 T_{dis} 随生活水箱水温 $T_{w,d}$ 的变化Fig.6 Variations of COP and T_{dis} with $T_{w,d}$

从图 6 可以看出，由于水泵置于 I 档时耗功较小，使得瞬时 COP_{sys} 和瞬时 COP_h 的差值不大，且随着生活水温的升高，偏差逐渐减小。可见，利用耗功较小的水泵优化水循环系统对制热性能系数的提高是相当有必要的。

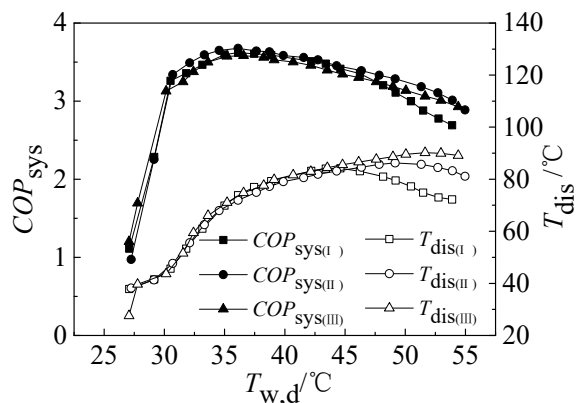
图7 Q_h 和 P_{sys} 随生活水箱水温 $T_{w,d}$ 的变化Fig.7 Variations of Q_h and P_{sys} with $T_{w,d}$ 图8 p_{dis} 和 p_{suc} 随生活水箱水温 $T_{w,d}$ 的变化Fig.8 Variations of p_{dis} and p_{suc} with $T_{w,d}$

加热终了时，集热水箱的水温降到了 19.1℃，经计算，热泵的总耗电量 W 约为 0.84 kW·h。

3.2.2 起始水温相同制热水

集热水箱和生活水箱的起始水温均为 27℃，水泵分别置于 I 档、II 档和 III 档，节流阀的开度一定。实验结果列于图 9~图 12 中。

从图 9 可以看到，不同水泵档位下 COP_{sys} 存在交叉，在生活水温不太高时水泵置于 I 档， COP_{sys}

图9 COP_{sys} 和 T_{dis} 随生活水箱水温 $T_{w,d}$ 的变化Fig.9 Variations of COP and T_{dis} with $T_{w,d}$

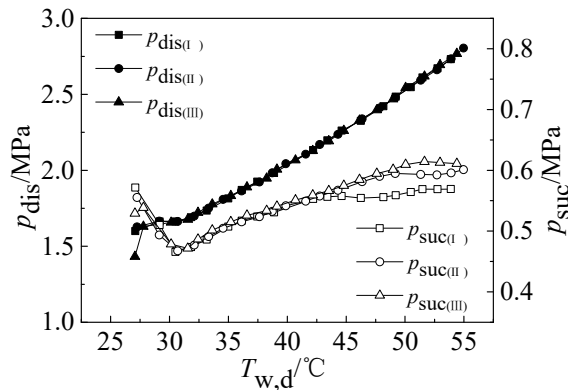


图 10 p_{dis} 和 p_{suc} 随生活水箱水温 $T_{w,d}$ 的变化
Fig.10 Variations of p_{dis} and p_{suc} with $T_{w,d}$

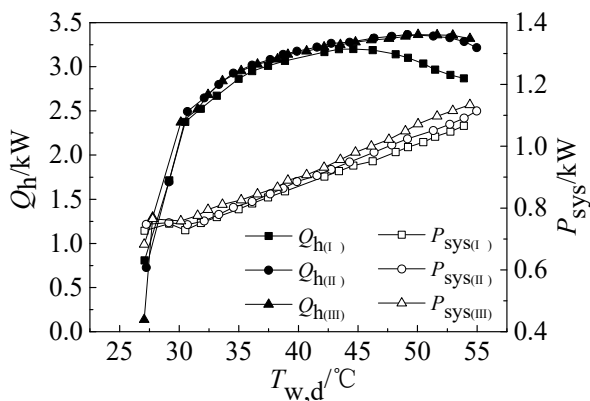


图 11 Q_h 和 P_{sys} 随生活水箱水温 $T_{w,d}$ 的变化
Fig.11 Variations of Q_h and P_{sys} with $T_{w,d}$

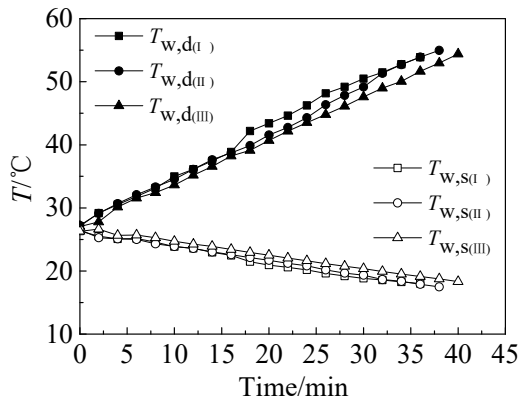


图 12 集热水箱水温 $T_{w,s}$ 和生活水箱水温 $T_{w,d}$ 随时间的变化
Fig.12 Variations of $T_{w,s}$ and $T_{w,d}$ with time

值较高,生活水箱水温较高时, COP_{sys} 反而低于 II 档和 III 档的 COP_{sys} , 但水泵耗功的减小对 COP_{sys} 的影响并不是很大。

从图 10 和图 11 可以看到,随起始水温 $T_{w,0}$ 的升高,节流阀的开度增大,制冷剂质量流量增大,使吸气压力 p_{suc} 升高,排气压力 p_{dis} 因吸气压力的升高有限,压比 PR 减小,减小了单位压缩机耗功,瞬时

制热量 Q_h 也因制冷剂质量流量的增加而增大,所以 COP_{sys} 随起始水温的升高而增大。

从图 12 可以看出,从总体上来看,在同一起始水温下,水泵耗功的减小对加热热水的时间影响也并不是很大。

表 3 为各工况下的总耗电量 W_h 汇总表。从表中可见,起始水温 27℃ 时,系统在水泵分别置于 I 档、II 档和 III 档时,耗电量相差不大。因此,在保证系统正常运行的前提下,水泵流量对系统性能影响较小,在多功能热泵系统水泵选型时最重要的是减小无用耗功。

表 3 太阳能辅助制热水模式各工况下的总耗电量 W_h (kW·h)
Table 3 Electricity consumptions W_h (kW·h) in the Solar-assisted heat pump water heating mode

起始水温不同制热水	起始水温相同制热水		
	0.84	0.64 (I)	0.61 (II) 0.63 (III)

从表 3 可以看到,与起始水温不同制热水相比,起始水温相同制热水可大大缩短制取热水的时间和减小耗电量。这是因为生活水箱中的水来自集热水箱中被太阳能预热过的水,所以生活水箱的起始水温较高,是一种新增的节能模式。

4 结论

本文提出了一种新型四换热器流程太阳能辅助多功能热泵,共有八种运行模式,并在自行搭建的实验装置上成功地实现了这些运行模式之间的平稳过渡和高效实现。该新型多功能热泵不但大大提高了设备的利用率,而且可以更好地适应不同季节的气候条件,起到显著的节能效果。特别适用于具有丰富太阳能,且全年需要制冷和采暖的地区,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] WANG Qin, HE Wei, LIU Yuqian, et al. Development of Vapor Compression Multifunctional Heat Pumps in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(9): 6522-6538.
- [2] Nussbaum O J. Heat Pump Using Solar and Outdoor Air Heat Sources: US Patent, 4363218A [P]. 1982.
- [3] 王勤, 梁国峰, 陈光明等. 一种多热源辅助多功能热泵系统: 中国专利, 201010114627.1 [P]. 2012. WANG Qin, LIANG Guofeng, CHEN Guangming, et al. A Multiple Heat Sources Assisted Multifunctional Heat Pump System: Chinese Patent, 201010114627.1 [P]. 2012
- [4] 王勤, 刘玉迁, 陈光明等. 一种间接式太阳能辅助多功能热泵系统: 中国专利, 201110079756.6 [P]. 2012 WANG Qin, LIU Yuqian, CHEN Guangming, et al. An Indirect-expansion Solar-assisted Multifunctional Heat Pump System: Chinese Patent, 201110079756.6 [P]. 2012
- [5] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDER M O. NIST (National Institute of Science and Technology), Standard Reference Database 23, Version 8.0 [DB]. Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology, 2007.